

УДК 004.942

М.Э. ПОДЫМАКО

РУП «Могилевлифтомаш», Республика Беларусь

С.С. ДОВНАР, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

А.С. КОВЕНЯ, Т.А. КОВЕНЯ, Д.А. ЧЕРНЫШЕВ, А.В. ШМЕЛЕВ, канд. техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

РАСЧЕТНАЯ ОТРАБОТКА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПАССАЖИРСКОГО МАЧТОВОГО ПОДЪЕМНИКА

В статье описан ход работ и результаты компьютерного моделирования в среде ANSYS с целью определения показателей прочности несущих и силовых систем строительного мачтового подъемника, приводятся особенности построения расчетных схем и режимов нагружения динамических и прочностных исследований объекта, приведены результаты оценки усталостной долговечности наиболее нагруженных элементов конструкций мачты подъемника.

Ключевые слова: силовые конструкции, мачтовый подъемник, расчетные схемы, режимы нагружения, конечно-элементное моделирование

Грузопассажирские строительные мачтовые подъемники являются относительно новым для Республики Беларусь, но чрезвычайно эффективным грузоподъемным оборудованием. Грузоподъемность существующих мачтовых подъемников находится в пределах от 400 до 10 000 кг, высота подъема грузов (или пассажиров с грузом) достигает 1000 м. Такие подъемники эффективны при строительстве, выполнении отделочных работ или ремонте многоэтажных и высотных зданий и сооружений, а также для транспортировки пассажиров на башни передатчиков, для ремонта и обслуживания мостов и пр. Принимая во внимание названные характеристики, было решено наладить производство строительных мачтовых подъемников на территории республики. Предприятием, которое взялось за освоение выпуска подъемников, стало РУП завод «Могилевлифтомаш». Учитывая объем предстоящих разработок и комплекс научных задач, требующих решения при подготовке к производству новой продукции, работы выполнялись в рамках Государственной научно-технической программы «Машиностроение» с привлечением институтов Национальной академии наук, в том числе Объединенного института машиностроения.

Одной из наиболее важных в комплексе сложившихся при разработке мачтового подъемника задач было обеспечения необходимых показателей прочности и долговечности несущих элементов конструкций. На стадии проектирования данная задача решалась в несколько этапов с применением для расчета прочности и долговечности программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS. Основные этапы работы отображены на блок-схеме на рисунке 1.

Таким образом, объектами исследования являлись несущие и силовые элементы строительного мачтового грузопассажирского подъемника. Ос-

новные узлы и конструкции, входящие в состав подъемника, представлены на рисунке 2.

Заданием на разработку были установлены следующие основные технические параметры строительного грузопассажирского подъемника: высота мачты — 96,512 м (восемь модульных фрагментов по 12,064 м каждый), номинальная скорость движения кабины — 35 м/мин, максимальная высота подъема — 100 м. На основе существующих конструкций-прототипов на начальном этапе работы были определены необходимые для расчетных исследований данные по конструктивному исполнению подъемника. Среди наиболее значимых для проработки вопросов были варианты расположения силовых элементов, их размеры, формы поперечных сечений балок. С учетом сказанного в программном пакете конечно-элементного анализа ANSYS были построены модели исследуемого объекта с различными вариантами размещения и формы силовых элементов. В качестве примера на рисунке 3 приведены секции мачты подъемника с различным расположением элементов.

Изготовление несущих конструкций подъемника планировалось с использованием сталей 10Г2 и 09Г2С, свойства которых, используемые при расчетах, представлены в таблице 1 [1].

При выполнении расчетов было принято, что вес перемещаемых частей кабины составляет 2500 кг; максимальный полезный груз с учетом 10-процентной перегрузки, что соответствует условиям заводских испытаний строительного грузопассажирского подъемника фирмы «Stros» [2], составляет 2250 кг.

На стадии предварительного анализа, выполненного в модуле RigidDynamics программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS, были разработаны упрощенные модели рассматриваемых вариантов конструкций. Основными целями данных работ было выполнение силового анализа системы и после-

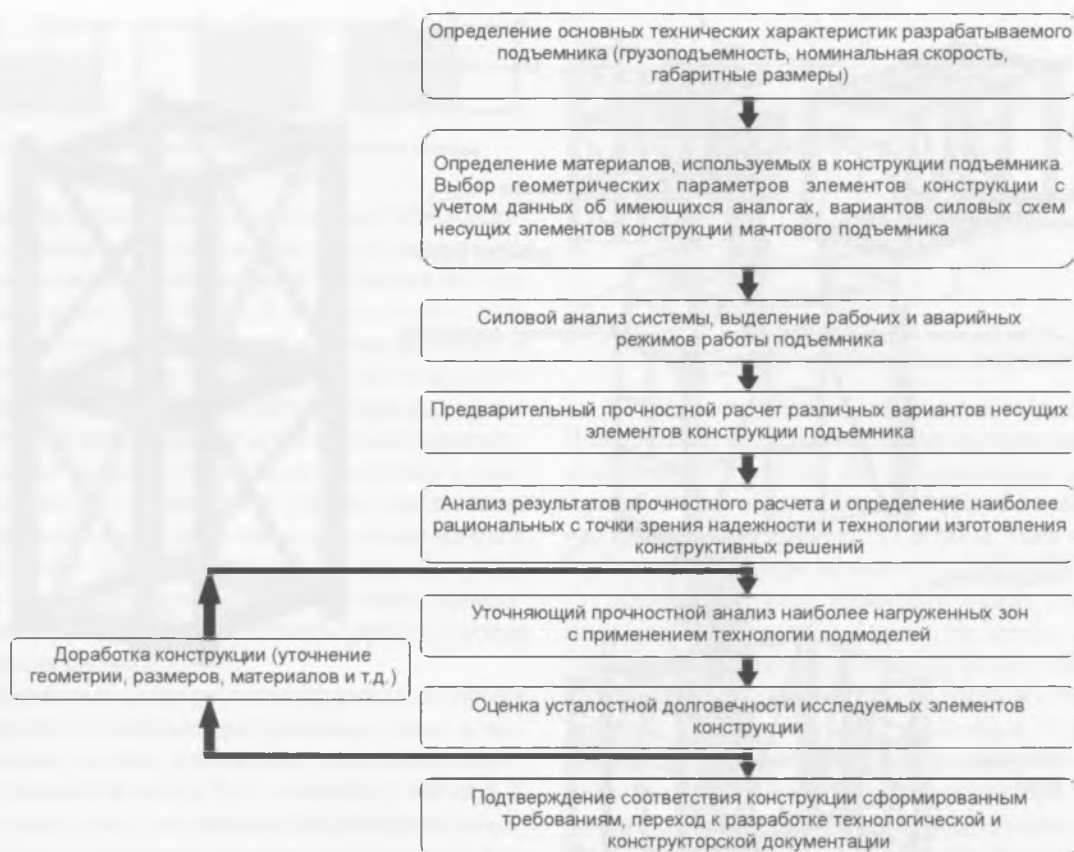


Рисунок 1 — Основные этапы расчетной отработки несущих и силовых конструкций подъемника

дующее получение предварительной информации по напряженно-деформированному состоянию различных вариантов конструкции в модуле прочностного анализа. Для кинематического и динамического анализа была сформирована твердотельная модель, включающая базовые формообразующие элементы силового каркаса кабины подъемника, фрагменты стоек мачты и зубчатой рейки, а также все необходимые элементы кинематических пар, участвующих в обеспечении заданного перемещения. При составлении расчетной схемы также учитывались различные варианты расположения груза в кабине, занимающего 2/3 площади пола (рисунок 4), а также тот факт, что условиями эксплуатации предусмотрено наличие зазоров между стойками мачты и боковыми роликами кабины.

С применением разработанных моделей подъемника были получены его расчетные параметры нагруженности для различных режимов работы. Таким образом были определены усилия в 20 различных точках, располагающихся в местах контактов зубчатых колес с зубчатой рейкой, а также в местах контактов ограничительных роликов с зубчатой рейкой и стойками мачты (рисунок 5). Полученные данные использовались в качестве граничных условий при прочностных расчетах как всей конструкции, так и ее отдельных элементов.

При расчетах принималось во внимание, что величины этих нагрузок обусловлены режимами работы подъемника и степенью его загрузки. Для расчета были приняты следующие рабочие режимы:

- движение кабины с постоянной скоростью и максимальным грузом;
- разгон или торможение кабины при движении с максимальным грузом — коэффициент динамичности $K_d = 1,6$ (старт вверх, остановка вверх, старт вниз и остановка вниз).

В качестве аварийного режима рассматривался случай срабатывания защитных механизмов при падении кабины (кабина с максимальным грузом — коэффициент динамичности $K_d = 2,5$). Исследовалось несколько вариантов, отличающихся расположением кабины в момент перехода в аварийный режим: расположение у опорной поверхности, расположение в середине пролета между землей и первой анкерной опорой.

Исследование напряженно-деформированного состояния мачты подъемника на наиболее общем уровне (мачты в целом и крупных ее фрагментов) выполнялось с применением балочных конечно-элементных моделей, что позволило определить усилия и деформации в элементах мачты при описанных выше режимах работы подъемника. На основе балочной конечно-элементной модели нижнего 12-метрового фрагмента мачты выполнены оценочные расчеты напряженно-деформированного состояния элементов мачты для двух вариантов ее исполнения — общей длиной 60 м и 100 м соответственно, отличающихся толщиной стенки трубчатой стойки мачты. Толщина стоек секций мачты в данных вариантах исполнения составляет 4 мм, за исключением стоек первой секции в составе

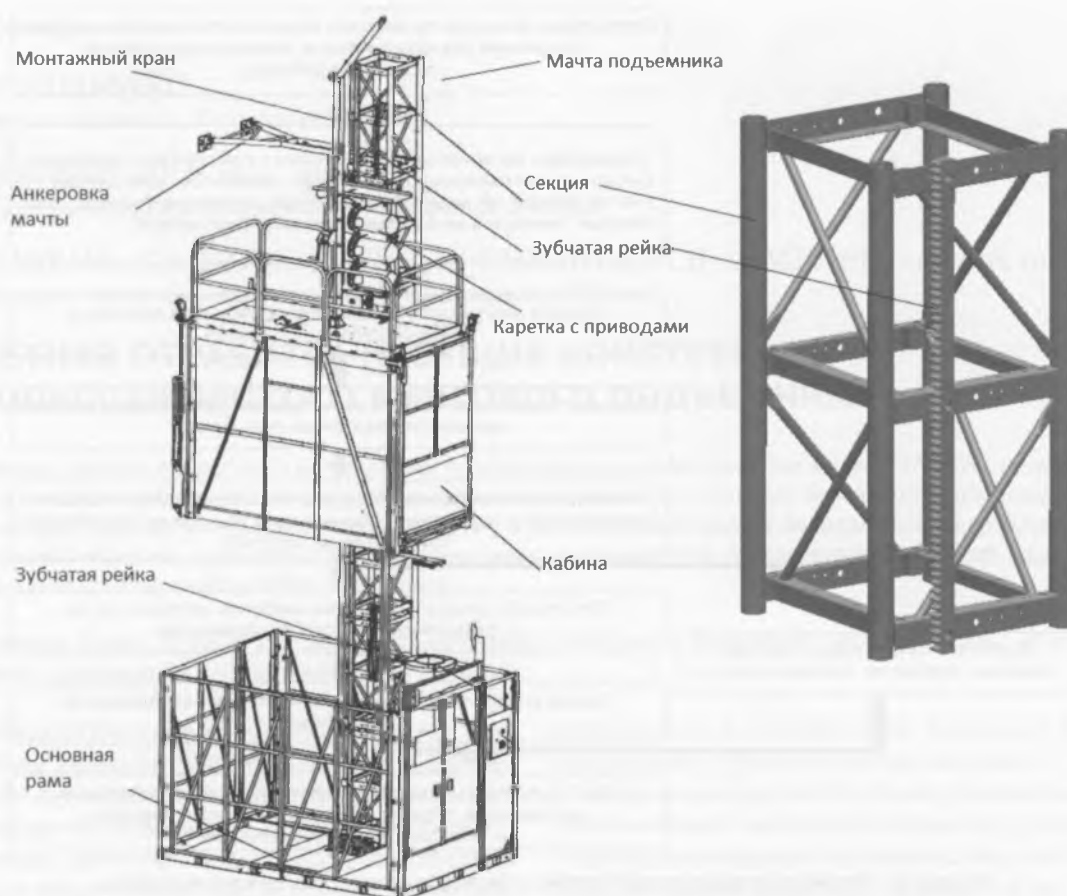


Рисунок 2 — Основные узлы и конструкции мачтового грузопассажирского подъемника

60-метровой мачты и восьми нижних секций в составе 100-метровой мачты, где толщина трубы составляет 6 мм. Аналогичная по структуре балочная модель была принята за основу в предварительных прочностных расчетах напряженно-деформированного состояния элементов 9-метрового верхнего консольного фрагмента мачты.

Для проведения детальных прочностных исследований более удачных вариантов конструкции мачты и кабины подъемника разрабатывались объемные и оболочечные конечно-элементные модели. На рисунке 6 приведены отдельные фрагменты моделей мачты, кабины, учитывающие наличие болтовых соединений, используемых для крепления секций мачты между собой.



Рисунок 3 — Конечно-элементные модели секции мачты подъемника с различным расположением силовых элементов

Как показали расчеты, наиболее нагруженными являются зоны конструкции непосредственно прилегающие к сварным соединениям, что с учетом цикличности действующих нагрузок и особенностей самих сварных соединений, может сопровождаться появлением и развитием усталостных повреждений. Поэтому завершающим этапом работы было проведение расчетной оценки усталостной долговечности основных несущих элементов подъемника, согласно руководящему документу DIN 15018[3], используемому при расчетах кранового и подъемного оборудования.

Учитывая количество режимов работы подъемника, а также количество рассматриваемых вариантов конструкции, по результатам расчетов были получены достаточно большие объемы данных, поэтому

Таблица 1 — Основные механические характеристики материалов

Название материала	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_y , МПа	Предел прочности σ_b , МПа
- сталь 10Г2 (трубный прокат)	$2,1 \cdot 10^5$	0,26	245	421
- сталь 09Г2С (листовые детали и прокатный профиль)	$2,1 \cdot 10^5$	0,26	345	490



Рисунок 4 — Варианты положения груза внутри кабины подъемника (вид сверху)

для примера приводятся только два характерных случая нагружения элементов мачты, соответствующих рабочим режимам подъемника и подпадающие под классификацию DIN 15018. В первом случае речь идет о нагрузке, приложенной непосредственно к узловому соединению — узлу, соединяющему стойки и поперечину, а также стойки и раскосы (ролик находится на уровне поперечины). Второй характерный случай касается приложения нагрузки в пространстве между узлами мачты (ролик находится на середине участка между точками крепления мачты к стене здания). Одной из наиболее нагруженных зон секции мачты является соединение стойки поперечины со стороны установки зубчатой рейки, которая показана на рисунке 7.

Полученные в ходе расчета численные значения напряжений в наиболее нагруженных узлах, а также исходные данные для оценки долговечности несущих элементов мачты представлены в таблице 2. Конструкция мачты по параметрам переменного напряженного состояния в узловом соединении удовлетворяет требованиям DIN 15018 и обеспечивает расчетное число циклов до $2 \cdot 10^5$ (200 тысяч циклов). Под циклом нагружения здесь понимается однократное прохождение кабины через контрольную зону мачты, поскольку при этом успевает произойти ее знакопеременное нагружение.

Согласно данным, приведенным в таблице 2, требования по обеспечению необходимой наработ-

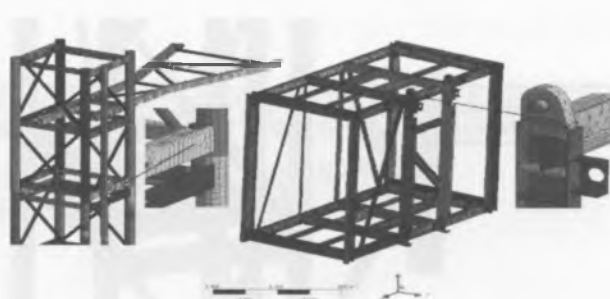


Рисунок 6 — Отдельные фрагменты моделей мачты, кабины, учитывающие наличие болтовых соединений

ки $2 \cdot 10^5$ циклов для обоих случаев выполняются. В первом случае максимальное напряжение цикла составляет 25,7 МПа, что не превышает допустимую величину напряжения 54 МПа. Во втором случае напряжение, равное 111,6 МПа, также не превышает допустимую величину — 168 МПа.

Анализ картины деформирования элементов нижнего 12-метрового фрагмента мачты показал, что максимальные перемещения испытывают зоны стоек мачты, воспринимающие нагрузку от нижних роликов кабины, наиболее удаленных от зубчатой рейки. По результатам моделирования с применением балочных моделей, не учитывающих наличие усилия от затяжки болтовых соединений секции, расчетная величина максимальных перемещений в элементах 12-метрового фрагмента мачты общей высотой 60 м находится в пределах 8 мм при движении кабины в стационарном режиме, 12 мм — в режиме разгона/торможения и 19 мм — в режиме аварийной остановки. Расчеты этого же фрагмента мачты с применением модели, учитывающей влияние затяжки болтовых соединений, показывают, что значения перемещений для указанных случаев на-

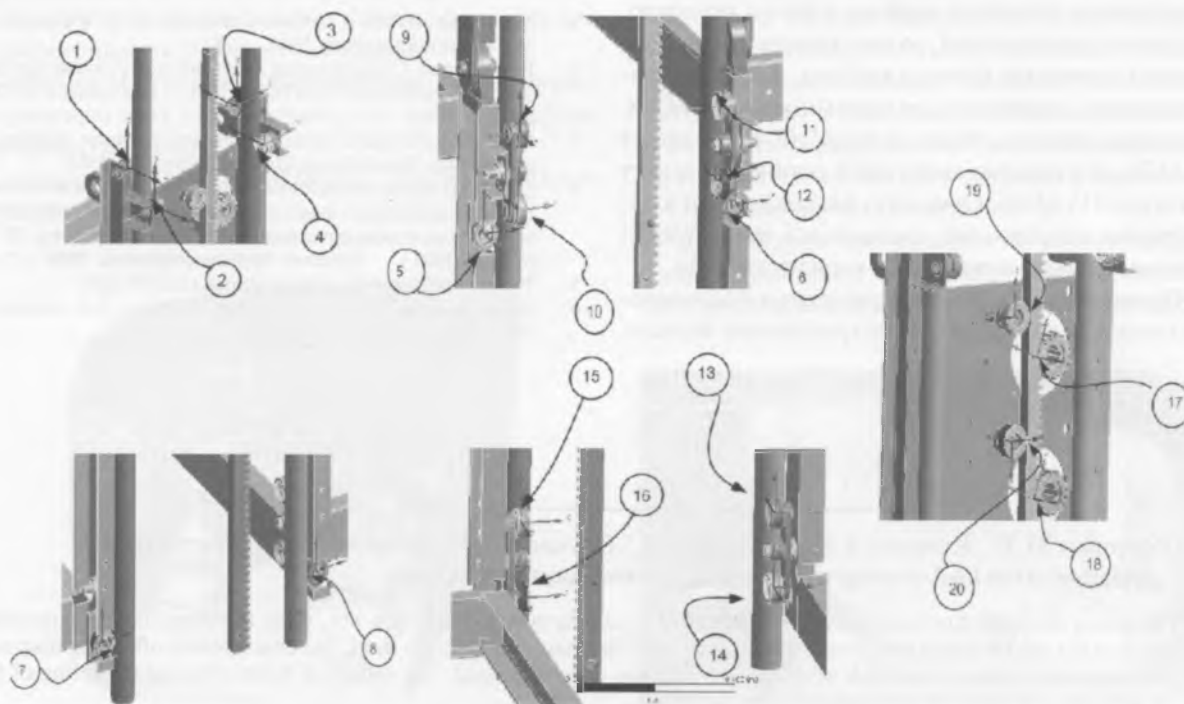


Рисунок 5 — Схемы расположения сил, действующих на элементы конструкции подъемника



Рисунок 7 — Распределение эквивалентных напряжений в элементах мачты

гружения составляют 4, 6 и 10 мм соответственно. Таким образом отличие между данными результатами достигает 50 %, что свидетельствует о необходимости учета усилий затяжки болтовых соединений при анализе напряженно-деформированного состояния мачты при эксплуатационных режимах.

Расчетами также установлено, что для рассматриваемого режима аварийной остановки напряжения в некоторых элементах 12-метрового фрагмента мачты 60-метрового исполнения могут достигать опасных значений от 240 МПа до 331 МПа. Что касается нижнего фрагмента мачты 100-метрового исполнения, то расчетные значения напряжений, возникающих в его элементах при аварийной остановке кабины, практически не превышают уровня 240 МПа.

Учитывая невысокое число аварийных режимов остановки, данные результаты принято считать допустимыми при обеспечении необходимого контроля установленных проведенными расчетами зон в ходе последующих экспериментальных исследований.

Моделирование напряженно-деформированного состояния несущего каркаса кабины показало, что уровень напряжений, возникающих в основных несущих элементах каркаса кабины, в режиме стационарного движения не превышает 120 МПа, в режиме разгона/торможения не превышает 170 МПа, а в режиме аварийной остановки может достигать 215 МПа. Отмечено несколько зон концентрации напряжений, связанных с конструкцией узлов крепления роликов к каркасу кабины.

Проведенный комплекс расчетных исследований позволил определить конструктивные вариан-

Таблица 2 — Исходные данные и результаты расчета долговечности несущих элементов мачты

Случай №1	
Минимальное напряжение цикла	- 89,3 МПа
Максимальное напряжение цикла	25,7 МПа
Размах напряжения	115 МПа
Расчетный коэффициент асимметрии цикла	- 3,47
Допустимое напряжение	54 МПа
Коэффициент концентрации напряжений	K4
Случай №2	
Минимальное напряжение цикла	- 164,9 МПа
Максимальное напряжение цикла	111,6 МПа;
Размах напряжения	276,5 МПа
Расчетный коэффициент асимметрии цикла	- 1,48
Допустимое напряжение	168 МПа
Коэффициент концентрации напряжений	K0

ты решений для силовых и несущих элементов строительного мачтового подъемника, удовлетворяющие требуемой прочности и технологии производства завода «Могилевлифтмаш». Результаты расчетной оценки долговечности несущих элементов подъемника по методике DIN 15018, позволили подтвердить правомерность выбора конструктивных решений, обеспечивающих работу при максимальной нагрузке не менее $2 \cdot 10^5$ циклов.

Список литературы

1. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. — М.: Машиностроение, 2003. — 782 с.
2. Руководство. Строительный пассажирско-грузовой подъемник NOV 2032 UP-I, NOV 2032 UP-II. — Селлчаны: СТРОС, 2005. — 91 с.
3. DIN 15018. Deutsche Norm: Cranes, steel structures, verification and analyses. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Nov 1984.
4. Протокол заводских испытаний подъемника строительного грузопассажирского фирмы «Stros» по определению кинематических и динамических показателей его работы (№ 35 от 31.03.2009). — Могилев: Могилевлифтмаш, 2009. — 5 с.
5. Режим доступа: <http://www.tehmak.com/01.html>
6. Басов, К.А. ANSYS: справ. пользователя / К.А. Басов. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 640 с.

Podymako M.E., Kovenya A.S., Kovenya T.A., Dovnar S.S., Chernyshev D.A., Shmeliov A.V.
Calculation of the load-bearing structures of the mast construction hoist

The article describes the workflow and the results of modeling in ANSYS, which were done to determine the parameters of strength of the load-bearing and supporting structures of the mast construction hoist, the construction of loading diagrams for kinematic and dynamic research and strength analysis were discussed; the results of finite element modeling of the mast in general and some of its fragments are included.

Поступила в редакцию 12.04.2012.